

3. Rowley C.W., Colonius T., Basu A. On self-sustained oscillations in two-dimensional compressible flow over rectangular cavities // J. Fluid Mech. – 2002. – 455. – P. 315–346.
4. Халатов А.А. Теплообмен и гидродинамика около поверхностных углублений (лунок). – К.: ИТТФ НАН Украины, 2005. – 76 с.
5. Larcheveque L., Sagaut P., Labb O. Large-eddy simulation of a subsonic cavity flow including asymmetric three-dimensional effects // J. Fluid Mech. – 2007. – 577. – P. 105–126.
6. Chang K., Constantinescu G., Park S.-O. Analysis of the flow and mass transfer processes for the incompressible flow past an open cavity with a laminar and a fully turbulent incoming boundary layer // J. Fluid Mech. – 2006. – 561. – P. 113–145.
7. Bres G., Colonius T. Three-dimensional linear stability analysis of cavity flows // AIAA Pap. 2007-1126. – 2007. – 16 p.
8. Colonius T. An overview of simulation, modeling and active control of flow/acoustic resonance in open cavities // AIAA Pap. 2001-0076. – 2001. – 12 p.
9. Kegerise M. A., Spina E. F., Garg S., Cattafesta III L. N. Mode-switching and nonlinear effects in compressible flow over a cavity // Phys. Fluids. – 2004. – 16, № 3. – P. 678–687.
10. Oshkai P., Rockwell D., Pollack M. Shallow cavity flow tones: transformation from large- to small-scale modes // J. Sound Vibr. – 2005. – 280. – P. 777–813.
11. Бабенко В.В., Воскобойник А.В., Воскобойник В.А., Турик В.Н. Вихреобразование в полусферической лунке на поверхности обтекаемой пластины // Тезисы V Междун. Конф. Проблемы промышленной теплотехники. – Киев: ИТТФ НАНУ, 2007. – С. 29–30.
12. Савельев А.Д. О влиянии задней кромки каверны на интенсивность пульсаций потока // Изв. РАН. МЖГ. – 2001. – N 3. – С. 79–89.
13. Халатов А.А. Теплообмен и гидродинамика поверхностно-вихревых систем: Украинские исследования // VI Минский Междунар. Форум по Тепломассообмену, ММФ 2008. – Минск, Беларусь, 2008. – PL-10. – С. 1–20.
14. Усачов А.Е., Гувернюк С.В., Лоханский Я.К., Стрижак С.В., Исаев С.А., Судаков А.Г., Баранов П.А. Вычислительные технологии для решения задач аэромеханики и теплофизики. Проблемы и тенденции развития // Материалы VIII Международной школы-семинара. «Модели и методы аэродинамики». – Москва: МЦНМО, 2008. – С. 139–141.
15. Турик В.Н., Бабенко В.В., Воскобойник В.А., Воскобойник А.В. Вихревое движение в полусферической лунке на поверхности обтекаемой пластины // Вестник НТУУ "КПИ": Машиностроение. – 2006. – № 48. – С. 79–85.
16. Rowley C.W., Williams D.R. Control of forced and self-sustained oscillations in the flow past a cavity // AIAA Pap. 2003-0008. – 2003. – 8 p.
17. Турик В.М., Бабенко В.В., Воскобойник В.А., Воскобойник А.В. Швидкості у приміжовому шарі над пластиною з напівциліндричним заглибленням // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2008. – № 4. – С. 46–54.

УДК 629.123

А. В. Малахов¹ д-р физ-мат.наук, И. В. Ткаченко¹, В. А. Маслов¹, О. Е. Гугуев¹, М. А. Колегаев² к.т.н.,
С. А. Карьянский²

1-Одесский национальный морской университет, г.Одесса, Украина; 2-Одесская национальная морская академия, г.Одесса, Украина

ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО РАЗДЕЛЕНИЯ МНОГОФАЗНЫХ ПОТОКОВ

Показана необхідність розробки судового вузла сепарації для розділення двофазного потоку на воду та тверду фазу. Запропоновано нове технічне рішення та приведено математичний опис процесу гідродинамічного розділення.

There was shown a necessity to create ship unit for two-phase flow separation onto liquid and solid phases. New technical solution was offered and developed mathematical description of fluid-dynamics separation process.

Совершенствование технологической схемы добычи грунта при проведении дноуглубительных работ является одним из решений проблемы модернизации судов дноуглубительного флота. С технической и экономической точек зрения в этом случае достигается увеличение сроков межремонтных периодов и рост рентабельности за счет сокращения ходов судна от места добычи грунта к месту его складирования.

В ходе исследований была поставлена задача получения нового технического решения в части отделения добываемого грунта от воды. Для этого был разработан гидродинамический узел сепарации. В нем, за счет возникающих специфических особенностей гидродинамического движения многофазного потока, достигалась оптимальная концентрация воды в транспортируемом грунте. Устанавливаемый при ремонте судна узел сепарации

выступает единственным техническим устройством, которое принципиально меняет стоимостные и технологические показатели проводимых дноуглубительных работ.

Общая схема разработанной судовой сепарационной установки показана на рис. 1.

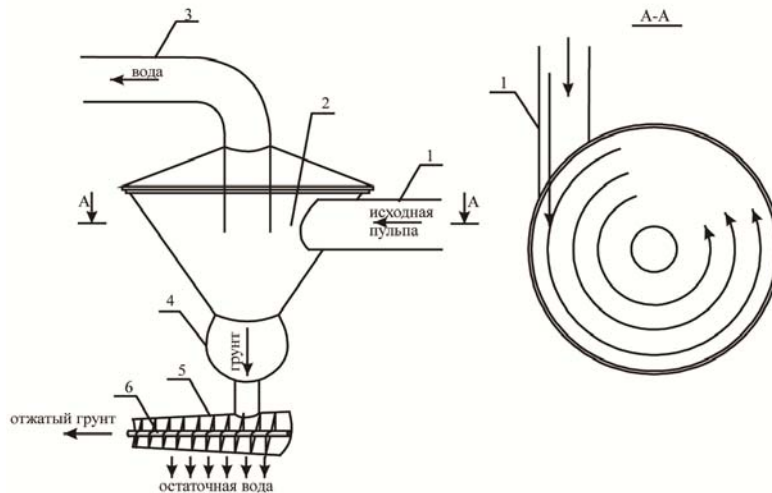


Рис. 1. Гидродинамический узел сепарации пульпы
1 – подводный грунтотвод; 2 – циклонная камера; 3 – трубопровод отвода воды; 4 – грунтотприемник; 5 – узел механического отжима; 6 – отжимной винт

Исходный поток грунтовой пульпы по подводному трубопроводу 1 подается в направляющий сопловой аппарат - переходный участок между грунтотпроводом 1 и конусной камерой узла сепарации 2. За счет тангенциального подвода пульпы происходит закрутка потока. Степень закрутки регулируется изменением характеристики подводного трубопровода, либо изменением напорной характеристики грунтового и вспомогательного насосов. При вращении потока в вертикальном и горизонтальном направлениях, в конусной камере узла сепарации, возникает его плотностная стратификация. Грунт отбрасывается к жестким

стенкам рабочей камеры 2 и за счет действия силы тяжести опускается вниз. В средней части циклона вращается несвязанная с грунтом осветленная вода. Для ее отбора предусмотрен вертикальный отводящий трубопровод 3. В последующем, грунт через грунтотприемник 4 поступает в узел механического отжима 5. Его основными элементами являются винт 6 и жесткий корпус. В нижней части узла 5 установлен перфорированный поддон для удаления остаточной воды.

Одним из главных рабочих элементов циклона является сопло, общая схема которого показана на рис. 2. Его входная часть посредством фланцевого соединения прилегает к основному грунтотпроводу, а выход обеспечивает закрутку потока пульпы в циклоне. Как видно на рис. 2 вытекающая струя расширяется от диаметра d_0 до d_s , образуя фронт размыва постоянной ширины, а по достижению жестких стенок циклона начинается закрутка пульпы.

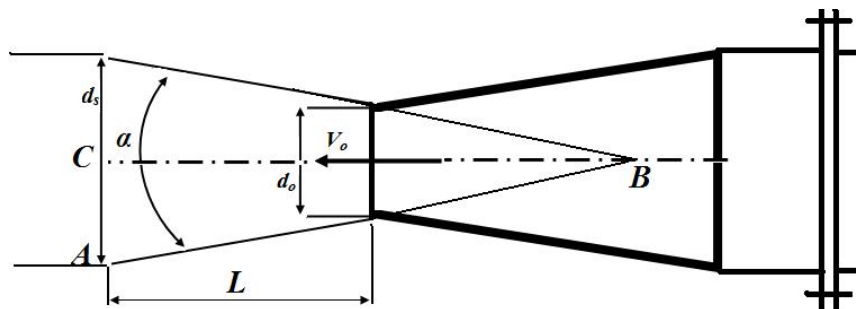


Рис. 2. Сопло для тангенциального подвода пульпы

Главной величиной является скорость закрутки струи на диаметре d_s , которую в первом приближении можно определить из равенства

$$V_0^2 \frac{\pi d_0^2}{4} = V_s^2 \frac{\pi d_s^2}{4} \quad (1)$$

Соотношение между углом конусности струи α и ее диаметром в различных сечениях треугольника ABC можно найти так

$$\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} = \frac{d_s - d_0}{L} \quad (2)$$

откуда

$$L = \frac{d_s - d_0}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \quad (3)$$

В соответствии с полученными результатами, а также данными работ [1, 2, 4] угол конусности струи α лежит в малых пределах от 14 до 19,5° и не зависит от диаметра d_0 и давления на срезе сопла.

При изготовлении сопла тангенциального подвода потока пульпы в циклон рабочий угол конусности струи α принимался равным 19° . Диаметр сопла на срезе рассчитывался так:

$$d_0 = \frac{L}{k \left(\frac{V_s + \sqrt{V_s^2 + 2g\varphi^2 \sum h}}{V_s} - 1 \right)}, \quad (4)$$

где φ – коэффициент истечения; $\sum h$ – суммарные потери напора от насоса до среза сопла, *м.в.ст.*

Напор потока на срезе сопла рассчитывался по выражению

$$H_0 = \frac{V_s + \sqrt{V_s^2 + 2g\varphi^2 \sum h}}{2g\varphi^2}. \quad (5)$$

Количество сопел тангенциального подвода N зависит от требуемой производительности установки. По этой причине суммарный напор вспомогательной насосной установки для узла сепарации грунта должен определяться следующим образом

$$H = H_0 + N \sum h. \quad (6)$$

Мощность, необходимая для работы сепарационной установки приближенно оценивается по суммарной мощности насосов, используемых в конструктивной схеме обработки грунта. В первом приближении ее можно представить как сумму трех величин – мощности, затрачиваемой на выемку и подъем грунта на поверхность воды, мощности, затрачиваемой на вход в циклон сепарационной установки и мощности расходуемой на гидравлические потери

$$N = Q_{zp} H_n (\gamma_{zp} - \gamma_e) + Q_{zp} H_u \gamma_{zp} + N_e, \quad (7)$$

где N – суммарная мощность, *Вт*; Q_{zp} – общая производительность земснаряда, $\text{м}^3/\text{с}$; γ_{zp} – удельный вес грунта, $\text{Н}/\text{м}^3$; γ_e – удельный вес воды, $\text{Н}/\text{м}^3$; H_n – высота подъема грунта до поверхности воды, *м*; H_u – высота подъема грунта до входа в циклон сепаратора, *м*; N_e – мощность на гидравлические потери, *Вт*;

Теоретическое решение задачи о вращающейся струе впервые было получено более ста лет назад. Рядом авторов рассматривались различные видоизменения постановочной части этой задачи – вращение посредством жесткого диска, вдув струи с закруткой и т. п., однако очень мало работ, где поток был рассмотрен как неоднородный. Следует отметить, что при движении многофазной струи с закруткой необходимо определять возникающее поле скорости с максимально возможным разрешением. Так, согласно данным работы [3] именно локальные скорости каждой компоненты смеси определяют суммарное значение средней скорости потока в целом

$$\bar{V} = \frac{1}{\rho} \sum_{i=1}^n \rho_i \bar{V}_i. \quad (8)$$

В рассматриваемом варианте сепарации многофазной смеси рассматривается случай движения закрученной струи с отбором тяжелой фазы в ее основании. В самом первом приближении такая задача может рассматриваться как сток и предварительная оценка получаемого таким образом течения может выполняться на основании известных результатов [3-5]. В сферической системе координат выражение для функции тока возможно получить при интегрировании уравнений

$$\left. \begin{aligned} V_R &= -\frac{Q}{4\pi R^2} = -\frac{1}{R^2 \sin \theta} \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \\ V_\theta &= 0 = \frac{1}{R \sin \theta} \frac{\partial \psi}{\partial R} \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

а конечный результат имеет вид

$$\psi = -\frac{Q}{4\pi} (1 - \cos \theta). \quad (10)$$

Поскольку в рассматриваемой задаче присутствует вязкость ее необходимо решать в постановке движения неньютоновского двухфазного (вода – твердая фаза) потока. В этом случае в качестве одного из вариантов теоретического описания задачи можно использовать следующие уравнения:

- неразрывности (с учетом условия неизменности удельной концентрации воды)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho V) = 0; \quad (11)$$

- концентрации фазы (с учетом отсутствия фазовых переходов между движущейся смеси)

$$\rho \frac{\partial C_i}{\partial t} + \rho V \text{grad} C_i = -\text{div}(\rho C_i (V_i - V)); \quad (12)$$

- динамики в напряжениях для смеси (двух фаз)

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} = \rho F + \text{div} P - \sum_{i=1}^2 \text{div}(\rho_i (V_i - V)(V_i - V)). \quad (13)$$

В уравнениях (11) – (13) использованы следующие обозначения:

$$\rho = \sum_{i=1}^2 \rho_i, \quad C_i = \frac{\rho_i}{\rho}, \quad V = \frac{1}{\rho} \sum_{i=1}^2 \rho_i V_i,$$

где i – индекс компоненты двухфазного потока; ρ – плотность, кг/м^3 ; C – концентрация; V – скорость, м/с ; F – главный вектор объемных сил; P – тензор напряжений.

Левая часть уравнения (12) представляет собой изменение совокупности локального и конвективного изменения концентрации i -й компоненты во вращающемся потоке. Правая часть характеризует диффузионное распространение i -й компоненты в смеси грунта с водой, причем слагаемое $(V_i - V)$ и представляет собой скорость этой диффузии.

Для решения системы уравнений (11) – (13) в первом приближении, иногда обозначаемом, как диффузионное приближение, необходимо использовать значения кинематических характеристик соответствующих обычному однородному потоку [3].

В ходе расчетов был подтвержден известный вывод о том, что при вращении пульпы в зависимости от соотношения плотностей частиц грунта ρ_{sp} и воды ρ_w возможны два режима сепарации грунта:

- при $\rho_{sp} > \rho_w$ грунт опускается вниз и отбрасывается к стенкам циклона;
- при $\rho_{sp} < \rho_w$ грунт поднимается вверх, приближаясь к оси симметрии циклона;

Исследования плотностной стратификации потока выполнялись для трех вариантов входа потока в циклон: через один, два и три направляющих сопловых аппарата. Полученные после статистической обработки результаты позволили сделать следующие выводы.

1. При входе основного потока в циклон через один направляющий сопловой аппарат возникающая тангенциальная закрутка потока характеризуется минимальной угловой скоростью. За счет малой величины момента вращения наблюдается характерный провал значений концентрации грунта. Изменение концентрации начинается от уровня равного $0,6$ высоты камеры. Трение потока о жесткие стенки камеры и потеря (из-за внутренних напряжений в потоке) динамического напора по направлению к суживающейся части циклона приводила к неравномерному распределению концентрации грунта во вращающемся потоке.

2. Максимальное расстояние от среза сопла до стенки циклона не должно превышать $0,5$ м. Превышение этого расстояния приводит к размытию фронта струи и рассеиванию частиц грунта по всей ширине циклона, что резко снижает его производительность по объемному расходу отделяемой воды.

3. Минимальное значение скорости струи на диаметре d_s , при котором процесс сепарации грунта остается эффективным является величиной переменной и зависит от вида, и концентрации грунта в воде. Так для илистого грунта оно равно $V_s = 0,1$ м/с, а для песка $V_s = 0,6$ м/с. Поскольку обрабатываемый грунт обычно представляет смесь различных видов грунта рекомендуемые рабочие значения скорости V_s должны выбираться из диапазона $1,5$ – 2 м/с.

Список литературы

1. Альтшуль А. Д. Гидравлические сопротивления / А. Д. Альтшуль – М.: Недра, 1970. – 216 с.
2. Башта Т. М. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. / Т. М. Башта, С. С. Руднев и др. – М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.
3. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. – М.: Наука, 1973. – 847 с.
4. Турбулентное смешение газовых струй / [Абрамович Г. Н., Крашенинников С. Ю., Секундов А. Н., Смирнова И. П.] – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1974. – 272 с.
5. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя: Пер. с нем. – М.: Наука, 1974. – 711 с.